

ShearSheet：静電容量タッチパネルに装着可能な透明シートを用いた剪断入力インタフェース

藤田 和之^{1,a)} 黄 梦婷¹ 高嶋 和毅¹ 土田 太一¹ 真鍋 宏幸² 北村 喜文¹

受付日 2020年4月7日, 採録日 2020年11月5日

概要：スマートフォンやタブレット端末等の既存のタッチパネルに装着することで、タッチパネル面に対する剪断力の入力を可能にするユーザインタフェース「ShearSheet」を提案する。本インタフェースは、透明のアクリルシートをタッチパネル上でスライドさせられる機構を備え、このスライドによる変位量を、シートの特設箇所に貼付された導電性物体によりタッチ入力として認識させる。これにより、外部センサを用いずに、従来のタッチ入力と、シートの物理的な移動による剪断入力の2種類を同一タッチパネル上で実現する。このインタフェースを実証するため、シングルタッチおよびマルチタッチによるインタラクション手法を設計するとともに、これらを用いたアプリケーション例を実装した。また、アプリケーションの代表例であるスマートフォンでの1次元スクロールタスクにおいて、既存のフリック入力と比較する実験を実施した結果、ShearSheetによるスクロールは同等の速さ、少ない操作回数でタスクを完了でき、参加者に好まれたことが分かった。

キーワード：剪断入力, タッチパネル, タッチインタラクション

ShearSheet: A Shear-force User Interface Using a Sheet Attachable to Capacitive Touch Panels

KAZUYUKI FUJITA^{1,a)} MENGTING HUANG¹ KAZUKI TAKASHIMA¹ TAICHI TSUCHIDA¹
HIROYUKI MANABE² YOSHIFUMI KITAMURA¹

Received: April 7, 2020, Accepted: November 5, 2020

Abstract: We propose ShearSheet, a novel user interface that enables tangential (shear) force input on a touchscreen using a transparent sheet attachable to existing touch panels such as smartphones and tablets. This interface has a slidable acrylic sheet on a touch panel, and its displacement due to the slide can be recognized as a touch input by a conductive material attached to a specific position of the sheet. It allows the user to input both conventional touch input and shear force input (triggered by the physical movement of the sheet) on the same touch panel without using external sensors. We designed single-touch and multi-touch interactions using our interface and implemented several application examples. As a result of an experiment evaluating our interface through a scrolling task, scrolling with ShearSheet was able to complete the task with equivalent speed to existing interfaces with fewer number of clutches and higher subjective preferences.

Keywords: shear-force input, touch panel, touch interaction

1. はじめに

タッチ入力は、コンテンツに直接触れて操作できるという直感性を有し、多くのインタラクティブデバイスで利用されている。特に近年では、スマートフォンやタブレット等のスマートデバイスの高性能化が著しく、これにともな

¹ 東北大学
Tohoku University, Sendai, Miyagi 980-8577, Japan
² 芝浦工業大学
Shibaura Institute of Technology, Koto, Tokyo 135-9548, Japan
^{a)} k-fujita@riec.tohoku.ac.jp

いアプリケーションも多機能化しつつある。その一方で、タッチ入力による操作はマウスやキーボード等を用いる場合に比べて入力可能な操作の種類に乏しく、一般にアプリケーションの機能が増えるにつれてこの問題は深刻となる。これを解決するため、タッチインタラクションを拡張する多くの研究がなされてきており、なかでも代表的なものとして、タッチ入力時の圧力を付加的なモダリティとして用いる方法があげられる。圧力を用いることで、入力方法をこれまでとほとんど変えることなく、様々な入力操作を実現できる。圧力は、これまでタッチパネルに対して垂直方向の力が主に検討されてきた（例：文献 [1], [5], [26]）が、水平（剪断）方向の力も検討されつつある（例：文献 [8], [11], [12], [21]）。これらの文献ではこの水平方向の力は Shear force または Tangential force と呼ばれており、本論文では Shear force の日本語訳である剪断力と呼ぶこととする）。垂直方向の圧力は 1次元の値として測定されるのに対し、剪断力は力の強さとその方向からなる 2次元のベクトル情報として考えることができるため、ジョイスティックのようなアイソメトリックな入力手法 [36] として、タッチ入力と併用することができるかと期待される。

しかしながら、これまでに提案されてきた剪断入力インタフェースは、実用面における課題が残されている。まず、剪断力の検出のために、多くの研究では圧力センサ等の外部ハードウェアを必要としている [8], [11], [12], [33]。感圧式のタッチパネルを用いて剪断力を推定する手法 [13], [22], [23], [24] もあるが、感圧式タッチパネルの普及は限定的である。また、一般的にアイソメトリックな入力手法では、入力時に物理的なフィードバックが提供されることが有用であるとされている [36] が、上記にあげた先行研究では、このようなフィードバックが提供されていない例がほとんどである。以上のような課題を解決し、タッチ入力と相性の良い剪断入力を汎用的なタッチパネル上で手軽に利用できるようにすることが、タッチインタラクションの拡張のために有益であると考えられる。

そこで本研究では、スマートフォンやタブレットで広く用いられている静電容量方式タッチパネルの特徴を活かし、外部センサを用いずに、通常のタッチ入力と剪断入力の併用を可能にするユーザインタフェース「ShearSheet」を提案する（図 1）。このインタフェースは、タッチパネルに透明なシートを重ね、そのシートをゴムバンドでタッチパネルの四隅に固定したものである。このシートの特定位置に導電性テープを貼付することにより、シート自体の変位量をタッチ入力として認識する。これにより、システムはシートが物理的に動くかどうかに応じて、通常のタッチ入力と剪断入力を区別できる。同時に、ゴムバンドの弾性力により、シートの変位量に応じてユーザに受動的な弾性フィードバックが提供される。このインタフェースは、特殊な材料を必要とせず低コストで容易に実装できるため、

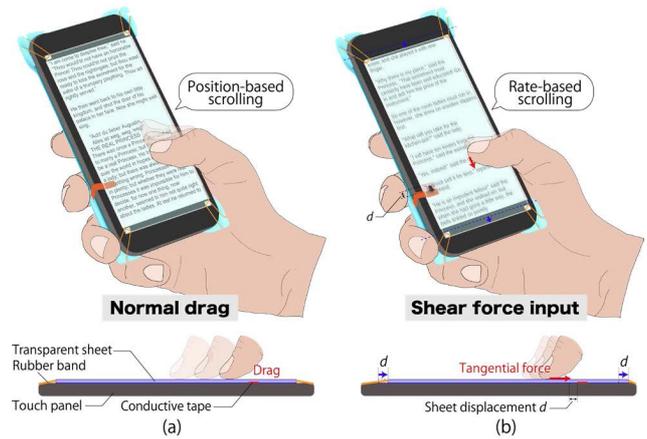


図 1 ShearSheet の概要

Fig. 1 Overview of ShearSheet.

用途に応じて多様な剪断入力を用いたインタラクションをデザイン可能であると期待される。本論文の主な貢献は次のとおりである。

- 静電容量タッチパネルに装着することで剪断入力を実現するユーザインタフェース ShearSheet の提案と実装
- ShearSheet を用いたシングルタッチ・マルチタッチインタラクションの設計とアプリケーション例の提示
- スマートフォンにおける ShearSheet を用いたスクロールパフォーマンスの評価

なお、本論文は発表済み国際会議論文 [14] に、実装とアプリケーション例、および議論の一部を追加したものである。

2. 関連研究

2.1 タッチインタラクションの拡張

タッチインタラクションを拡張する研究は、タッチエリアの比較的小さい携帯端末やウェアラブルデバイスを主な対象として活発に行われてきた。代表的なアプローチの 1 つとして、インタラクション可能な領域を画面の周囲 [7], [10], [28], [29] やデバイスの背面 [4], [6], [9], [19], [20], [32] に拡張する方法があげられる。また、スマートフォンの保護ケースのように装着することで利用できるインタフェースも提案されている [18], [25], [27], [34]。これらのインタフェースは、たとえば外部の光学式センサシステム [7], [28]、デバイスの背面に配置するフォトリフレクタ [6]、静電容量センサ [20]、圧力センサ [4] を使用する等、センサデバイスを追加することを前提とするものがほとんどである。一方で CamTrack-Point [34] は、スマートフォンの背面カメラの手前に可動式のリング型オブジェクトを取り付け、このリングの動きをカメラで取得することにより、追加のセンサを使わずジョイスティックのような 2次元方向の入力を実現している。また、静電容量方式のタッチパネル上から導電性素材を引

き伸ばし、タッチ領域を拡張するアプローチも検討されている [15], [17], [31]. たとえば ExtensionSticker [17] では、導電性インクで印刷されたステッカをディスプレイの端に貼り付けることで、外部センサを使わず画面領域外のタッチ入力を実現している.

一方、近年一部のスマートフォン (iPhone 6s 等) に感圧センサと静電容量センサを同時に備えるタッチパネルが搭載されたことから、タッチの圧力を入力モダリティとして利用する手法も活発に検討されてきた [1], [5], [26]. これらの手法は、既成のハードウェアを用いるためソフトウェアの調整のみで実現でき、また既存のタッチ操作と自然に組み合わせられることが利点であるが、入力の際に物理的なフィードバックをとまわず、慣れるために時間がかかることが指摘されている [36]. 以上で述べてきた多数の研究は剪断力の入力に直接関係するものではないが、タッチインタラクションを拡張することの重要性を裏付けているといえる.

2.2 剪断入力を用いたユーザインタフェース

剪断入力のアイデア自体は古くから考えられてきた. 1978年、タッチパネルにひずみゲージを組み合わせたデバイスを用いて剪断力を検出する手法が提案され [13], その後すぐに類似の手法を用いた多数のインタラクション手法も考案された [22]. これらは比較的大がかりな機器を必要とするものであったが、最近では携帯端末にも実装可能な手法が考えられている. Heoらは、12個の圧力センサを使用し、タッチパネルへの圧力と剪断力を検出可能とするスマートフォンケース型のデバイスを開発した [11]. また、彼らの後の研究では、圧力センサに加え、静電容量タッチパネルに対する指の接触領域の動きを取得することにより、マルチタッチの剪断入力を推定する手法を提案している [12]. これらの研究は、既存のスマートデバイスへ実装できることが利点であるが、操作時には物理的なフィードバックが提供されないことが欠点としてあげられる.

Harrisonら [8] は、2つのアナログジョイスティックをタッチパネルとディスプレイ面の間に配置することにより、タッチパネル自体を物理的にスライドする剪断入力を可能とするインタフェースを実現した. また、彼らはこのインタフェースの利用シナリオとして、連続的な速度制御や微調整操作等の5つを提案している. Xiaoら [33] は同様のアイデアをスマートウォッチに適用し、ウォッチフェイスを用いた剪断入力によるインタラクションを実現した. これらの研究は、いずれも剪断入力とそれにとまなう物理的なフィードバックを提供するが、タッチパネル自体にハードウェアの改修が必要であり、既存のスマートデバイス等に容易に導入できるわけではない. 一方、Nakaiらは、タッチパネル上に柔らかいジェル状の層 [24] またはスライド可能なプラスチック製シート [23] を重ねることにより、タッ

チ点の変位量から剪断力を推定する手法を提案している. これらの方法は、外部センサを用いずに利用可能であるものの、剪断入力が通常のドラッグ操作と競合する場合がある. 市販品としては、静電容量方式タッチパネルに貼り付けて利用できるジョイスティックがあげられる (文献 [37] 等). これらは、弾性フィードバックをとまなう剪断入力を画面の特定場所に付加できるが、取り付けた場所では通常のタッチ入力と剪断入力の併用はできない.

また、本研究が刺激を受けたインタフェースとして、RubberEdge [3] があげられる. これは、タッチパッドの外周に、ゴムバンドでつながれたリング型オブジェクトを取り付けたインタフェースである. このインタフェースを用いることで、従来のタッチパッドによる位置制御と、リングの移動 (剪断入力) による速度制御のスムーズな切替えが低コストで実現可能である. しかし、この切替えができるのはタッチパッドの外周付近のみであり、言及されている用途もカーソル移動に限られている.

以上のように、これまで剪断力を入力するための手法は数多く提案されているが、①既存のスマートデバイスやタッチパネルに容易に実装できること、②剪断入力時に物理的なフィードバックが得られること、③タッチパネル上の任意の場所で通常のタッチ入力と剪断入力の併用が可能であること、の3点を同時に満たすものはまだない.

3. ShearSheet

本研究では、剪断力の入力を既存のタッチパネルにも容易に実装可能なユーザインタフェース ShearSheet を提案する. ShearSheet の概要を図 1 (a) および 1 (b) に示す. 本インタフェースでは、透明なシートをタッチパネルに重ね、シートの四隅をゴムバンドで固定することにより、シートを一定距離だけ移動可能とする. さらに、シート上の特定的位置には導電性物体を貼付し、その位置を静電容量タッチパネルによりタッチ入力として取得することで、シートの移動量が算出できる. ゴムバンドでつながれたシートを弾性体と考えると、フックの法則より、剪断力 (すなわち、シートをスライドさせる力) はシートの変位量に比例すると考えられるため、検出されたシートの移動量を剪断力の強さとして利用する. また、シートをスライドさせた際、その変位量に応じて、ユーザの指にはゴムバンドによる弾性フィードバックが発生する. 一方で、シートに力を加えずに指をスライドさせることで、既存のドラッグ操作も利用可能である. この機構は、外部のセンサや電源を用いず、安価な素材で作製できるため、たとえばスマートフォンケースのようなアタッチメントとしての応用が期待できる. また、静電容量方式タッチパネル (またはタッチパッド) であればサイズを問わずに実装可能である.

3.1 基本的なメカニズム

ShearSheet は、静電容量方式のタッチパネルの利用を前提としている。静電容量タッチパネルでは一般に、接地された導体が接近することによる静電容量の変化によりタッチを検出しており、この特性を利用した様々なインタフェース [15], [17], [31] が提案されているのは先に述べたとおりである。本研究でもこれらと同様に、導電性の物体をシートの裏面（タッチパネルと接する面）の特定箇所に貼り付ける。この状態ではシート上の導電性物体（以下では導電部と呼ぶ）は接地されておらず、導電部がタッチパネルにより検出されない場合がある。このため、導電性物体をデバイスの裏側まで延長させ、デバイスを把持するユーザの手に触れさせる等の方法で接地させる。以上の機構を用いることにより、導電部との接点が指によるタッチと同様に取得可能になる。

ソフトウェア側の実装はアプリケーションによって異なるが、ここでは共通して備えるべき機能について述べる。基本的には、ソフトウェアは導電部の初期位置（既知）からの変位量に基づき設計する。ただし、シートの位置ずれやゴムバンドの経年劣化等の理由で導電部の初期位置や変位量が変化する場合が考えられ、この場合、剪断入力の実検出精度に悪影響が出る。これを防ぐため、導電部の初期位置と最大の変位量をアプリケーション使用前にキャリブレーションする必要がある。また、通常のタッチ操作およびドラッグ操作中に意図せずシートが動いてしまうことによる剪断力の誤入力を防ぐため、剪断入力を発動させるための閾値を設定する必要がある。

3.2 プロトタイプ実装

以下に、スマートフォン、タブレット、タッチパッドのそれぞれに対する ShearSheet の実装について述べる。

3.2.1 スマートフォンへの実装

図 1(a) にプロトタイプ概観を示す。このプロトタイプは、LG Nexus 5X (5.2 インチディスプレイ, W73 × H147 × D7.9 mm, 136 g) に実装したものである。透明シートとしては厚さ 0.5 mm のアクリル板 (W60 × H130 mm) を使用した。シートの下端から 20 mm, 左端の位置には導電性テープ (3M CU35C, 幅 5 mm, 銅製, 厚み方向にも導電性を持つ) を貼り付ける。シートの四隅には、ゴムバンドを固定するためのスリットを備えた直方体形状のフックを、3D プリンタで作製し取り付けた。

スマートフォンの背面には、図 2(a) に示すように、X 字型のケースを設計し、3D プリンタで印刷したものを取り付けた。このケースには、ケースの形状に沿うように 2 本の導電性テープを平行に貼り付け、これを透明シート側に貼り付けたテープと接触するようにした。これは、ユーザがデバイスを把持している間は導電テープを手に触れさせ、導電部を接地するためである。ケースの背面側の四隅



図 2 ShearSheet のプロトタイプ概観 (a) スマートフォンへの実装, (b) タブレットへの実装, (c) タッチパッドへの実装

Fig. 2 ShearSheet prototype with (a) a smartphone, (b) tablet and (c) touch pad.

にはそれぞれネジ穴があり、ゴムバンドを固定するためのネジを留めた。ゴムバンドは、一般的な輪ゴム（共和、自然長での直径 23 mm）を用い、前面のシートの角と背面のネジとの間を接続する。ゴムバンドの巻数を増減させることにより弾性フィードバックの大きさを変えられるが、本実装では親指でシートを無理なく動かせるようあらかじめ調整し、結果として左右上下方向に最大約 6 mm 動かせる程度とした。

3.2.2 タブレットへの実装

タブレット端末 (iPad Pro 11-inch, MTXN2J/A) に対し、図 2(b) に示すプロトタイプを実装した。基本的な実装方法はスマートフォンの場合と同様であるが、タブレットは把持せずに利用することも多いため、導電部の接地方法については Voelker らの研究 [30] を参考にした別の方法を考案した。図 2(b) に示すように、コの字型に切り取った透明の導電性素材（酸化インジウムスズのフィルム）の端点それぞれをタッチパネルに接触させることで、これらの 2 点は接地しなくてもタッチ入力として認識される。この方法は、前述のような導電性テープをデバイス裏側まで延長する機構が不要である点で優れているが、タブレットデバイスの機種によっては、オペレーティングシステムに備わった適応フィルタリングにより、時間経過につれて導電部がタッチ検出されなくなる場合がある [30]。また、前述の方法に比べ、導電部がタッチパネルのより広い領域を占有してしまうことも欠点といえる。

3.2.3 タッチパッドへの実装

ノート PC (MacBook Pro 13-inch, 2017, Four Thunderbolt 3 Ports) のタッチパッドにも ShearSheet の機構を

表 1 ShearSheet による上下方向スクロールのアルゴリズム

Table 1 Algorithm for vertical scrolling with ShearSheet.

Set d as vertical displacement of conductive part (signed value) if $ d < d_{min}$ then $r \leftarrow 0$ (a) else if $ d > d_{min}$ && $ d < d_{max}$ then $r \leftarrow a * d^2$ (b) else $r \leftarrow a * d_{max}^2$ (c) Set $basePos$ as position from which drag started Set $dragDisp$ as vertical drag displacement from $basePos$ (signed value) Set $frameRate$ as screen refresh rate $scrollPos \leftarrow basePos + dragDisp + r / frameRate$
--

実装できることを確認した。図 2(c) に示すように、タッチパッド全体を覆うように透明シートを設置し、スマートフォンへの実装と同様に導電性テープを透明シートの裏側に貼り付け、このシートを四隅からゴムバンドで固定している。本実装では、導電性テープの一端が PC の筐体に接地されているため、スマートフォンでの実装のような導電性テープの延長を必要とせず、図 2(c) の状態で導電部がタッチ認識される。

3.2.4 スクロールインタフェースの実装

ソフトウェア側の代表的な実装例として、ここでは後述のユーザスタディにも使用する 1 次元（上下方向）のスクロールインタフェースについて述べる。ShearSheet を利用したスクロールの挙動は、導電部の初期位置からの垂直方向の変位量に基づいて決定される。この変位量を d とするとき、各フレームにおけるスクロール速度 r およびスクロールの画面位置 $scrollPos$ の算出アルゴリズムは、擬似コードで表 1 のように表される。

ここで d_{min} と d_{max} は、それぞれ速度制御スクロールにおける最小速度と最大速度を与える変位量の閾値であり（図 3）、 a は定数である。閾値 d_{min} は、剪断入力の誤検出が起こらないよう調整され（表 1(a)）、変位量 d がこの値を下回っている間は、従来どおりのドラッグによる位置制御操作モードとなる。なお、本実装では速度制御と位置制御を明確に区別するため、位置制御操作時にはフリックジェスチャによる慣性スクロールを用いなかった（フリックによる慣性スクロールは、速度制御インタフェースの 1 つであるとも考えられるため）。変位量が閾値 d_{min} を超えると速度制御によるスクロールに切り替わる（表 1(b)）。この際のスクロール速度 r (mm/s) は、定数 a を用いて表 1(b) および 1(c) のように表される。すなわち、閾値 d_{max} を超えるまでは変位量 d の二次関数、 d_{max} 以上では定数の速度となる。これは、タッチの圧力を速度制御に用いている関連研究 [1], [26] での伝達関数を参考にしている。定数パラメータは、予備実験を通して自然な挙動となるよう決定し、 $a = 27.8$, $d_{min} = 0.5$ (mm), $d_{max} = 5.0$ (mm) とした。このパラメータを用いて、上下左右のランダム方向へドラッグ入力と剪断入力の各 100 回ずつをランダムに入力

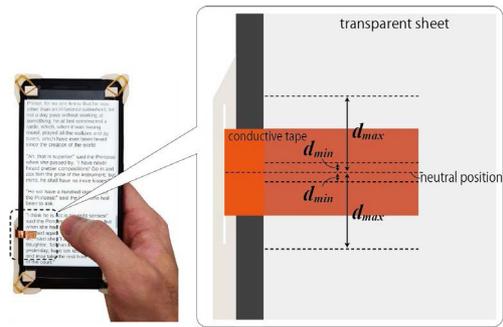


図 3 導電部の変位量の閾値

Fig. 3 Thresholds of the conductive part's displacement.

してもらい簡易なユーザテスト ($N = 2$) を行ったところ、剪断入力の検出精度は 100%であった一方で、ドラッグ入力の 4%の試行で剪断入力に誤検出された。

4. ShearSheet を用いたインタラクション手法

本章では、ShearSheet によって実現可能なインタラクション手法とそれらのアプリケーション例について述べる。1 本指によるインタラクションと、より発展的なマルチタッチインタラクションの 2 つに分けて紹介する。

4.1 シングルタッチインタラクション

ShearSheet は、基本的にはこれまでの剪断入力に関する研究（例：文献 [8], [11]）で検討されてきたインタラクションをサポートする。剪断入力のモダリティが追加されることで、特にユーザがデバイスを片手で保持している際に大きな効果が期待される。以下では、1 本指による剪断入力を用いたインタラクションとして、速度制御入力とジェスチャ入力の 2 つについて述べる。

4.1.1 速度制御入力

ShearSheet における剪断入力時のシートの動きは、2 次元方向にわずかにスライドし、入力をやめると自動的に元の位置に戻るという点で、ジョイスティックに類似している。一般にジョイスティックをはじめとするアイソメトリックな入力デバイスは、速度制御の入力方法との親和性が高いと報告されている [35], [36] ため、ShearSheet も同様であろうと考えられる。さらに、ジョイスティックとは異なる ShearSheet の利点は、剪断入力（速度制御）と通常のドラッグ動作（位置制御）をスムーズに切替えられることである。すなわち、これらの 2 種類の操作の切り替えが多く発生する場面でも物理的な指への負荷が減らせると期待される。

具体的な速度制御入力の利用場面としては、スクロールインタフェースがある。大きな情報空間を持つコンテンツを閲覧する場合、通常ユーザは指を繰り返しフリックしてスクロールする必要がある。ShearSheet を用いることで、

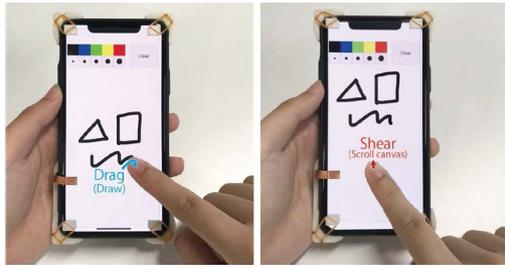


図 4 描画アプリケーションでの動作例

Fig. 4 Usage example in a drawing application.



図 5 ビデオ再生時の動作例

Fig. 5 Usage example in video playback.

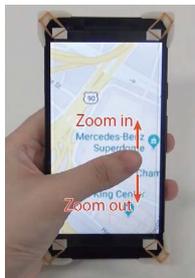


図 6 地図操作での動作例

Fig. 6 Usage example in map navigation.

この通常のスクロールに加え、シートの変位量に応じたスクロール速度制御入力を実現する。図 1(a)と 1(b)に示した例では、通常のフリックスクロールと速度制御スクロールの 2 種類の操作を、ほとんど指を動かさずに切替え可能である。剪断入力を用いたスクロールインターフェースは Harrison らも検討している [8] が、彼らは通常のスクロールとのスムーズな切替えには言及していない（彼らの実装では、位置制御と速度制御とでは反対方向に指を動かす必要があり、切替えはスムーズとはいえない）。このアイデアを用いると、たとえばキャンバスへの描画やドキュメントへの注釈付けのインタラクションが発生する場合にも、スクロール操作との切替えはスムーズになる（図 4）。別の例として、ビデオを再生する場面では、画面上に追加のウィジェットを表示することなく、再生位置のコントロールが可能になる（図 5）。さらに、剪断入力を地図等のコンテンツのズーム操作に割り当てることも可能である（図 6）。この例は既往研究 [8] でも検討されているが、ShearSheet は触覚フィードバックをとまなう点で異なり、より細かな速度制御がしやすいと考えられる。

4.1.2 ジェスチャ入力

特定のアクションを発動させるトリガとなるジェスチャとして剪断入力を用いることも可能である。現在よく使われているタッチパネル上のジェスチャ（たとえば、画面の端からのスワイプ等）とは異なり、ShearSheet によるジェスチャは、画面上のどこでも入力できることが利点といえる。既往研究（文献 [8], [11] 等）でも、特定方向へのフリック、円運動、文字を描く等の様々なジェスチャ入力が検討されており、これらは ShearSheet でも利用可能である。たとえば図 6 に示す例では、シートを右下方向に素早く動かすジェスチャにより画面全体が縮小され、片手でデバイスを把持している際に画面上部のコンテンツにアクセスしやすくなる。

4.1.3 タッチパッドでのカーソル操作

タッチパッドの入力環境では、たとえばカーソルの位置制御と速度制御を剪断入力の有無によって切り替えるという利用例が考えられる。これは RubberEdge [3] と似ているが、タッチパッドの外周だけではなく、シート上であればどこでも切替えが可能という点で異なる。また、タッチパッド（特にカーソル操作）は、一般に入力面における指の相対的な移動量を入力としており、入力面と画面の絶対位置が 1 対 1 で対応しているタッチパネルやペンタブレット等とは異なる。これらの相対座標入力と絶対座標入力を、両手によるジェスチャで切り替える手法が提案されている [16] が、ShearSheet での剪断入力の有無によりこれらを切り替える（たとえば、剪断入力時には絶対座標入力、通常のタッチ時には相対入力とする）ことも可能である。

4.2 マルチタッチインタラクション

次に、ShearSheet を用いたマルチタッチインタラクションについて考える。既往研究として、Heo らは 2 本指による剪断入力インタラクションを検討している [12] が、ピンチイン・アウトのみであった。以下では、通常の ShearSheet を用いたインタラクション手法に加え、デバイスの一部に変更を加えることで実現可能なものについても述べる。

4.2.1 通常タッチ・剪断入力の併用

まず、通常のタッチ入力と剪断入力を併用するインタラクション手法を考える。これは、たとえばタッチパネルの領域を、剪断入力専用の領域と通常タッチ入力専用の領域の 2 つに分けることで容易に実現可能である。具体的な例として、スマートフォンでプレイ可能な一人称シューティングゲーム (FPS) ゲームでは、従来、画面上に表示されるジョイスティックを操作してキャラクターを移動させることが多いが、ユーザはこのジョイスティックの位置を目視で確認しながら操作しなければならない。これに対し図 7 に示すアプリケーションでは、この操作を ShearSheet による剪断入力に置き換えている。なお、剪断入力は画面の左半分、通常のタッチ入力（視点移動に使われる）は画面



図 7 ジェスチャ操作例

Fig. 7 Usage example of a shear force gesture.



図 8 FPS ゲームでの動作例

Fig. 8 Usage example in an FPS game.



図 9 カーレースゲームでの動作例

Fig. 9 Usage example in a car racing game.

の右半分であれば任意の場所で操作可能であるため、プレイはゲーム画面に集中できるようになると期待される。

4.2.2 複数の剪断入力

以下では、3章で述べた実装にマイナーな変更を加えることで実現するインタラクションについて考える。まず1つ目に、透明シートに複数の導電部を配置することで、より複雑なシートの動きを検出できると考えられる。たとえば、図8に示すよう時計回り・反時計回り方向への剪断力は、導電部の2つの位置関係から算出可能である。これは、たとえばカーレースゲームのハンドル操作の場面等において直感的なユーザ体験を実現する(図9)。別の例として、剪断力をともなうピンチイン・アウトも考えられる。これは、シート自体を伸縮・湾曲可能なものに変更することで実現可能である。これにより、たとえば速度制御のピンチズーム等のインタラクションが可能になる。図10(a)は湾曲するシートを用いたピンチアウト時の様子であるが、シートがタッチパネルから離れる箇所があるため、導電部の配置には注意が必要である。

さらに、図10(b)に示すように、複数枚のシートを個別に配置することで、1つのタッチパネル上で複数の剪断



図 10 マルチタッチインタラクション例。(a) 剪断力をともなうピンチイン・アウト、(b) 複数のシートの検出と(c) その利用例

Fig. 10 Examples of multi-touch interaction. (a) Shear-force pinch interaction. (b) Individual shear interaction using two sheets and (c) its application example.

入力を行うことが可能である。これを用いると、たとえば図10(c)に示すような、個別のウィンドウのスクロールを制御する等のアプリケーションが考えられる。シートの形状やサイズは変更可能であるので、用途に合わせてタッチパネル上の任意の場所に操作系統をデザインする使い方ができる。

5. ユーザスタディ

ShearSheetの有用性を確認するためのユーザスタディを実施した。この実験では、前章で述べたShearSheetによるインタラクション例の中で最も利用機会の多い場面の1つであると考えられる、スマートフォンでの速度制御スクロールのパフォーマンス調査に焦点を当てる。剪断入力によるスクロールは、垂直方向の1次元スクロールと親和性が高いことが知られている[21]ことから、本実験ではこれを採用し、実験タスクを1次元スクロールのシンプルなターゲット獲得とする。

5.1 参加者

参加者は12名(男性6名、女性6名、平均年齢 = 24.75歳、SD = 1.54)であり、全員ShearSheetの使用は初めてであった。約50分間の実験(事前説明、練習、事後アンケート、休憩を含む)終了後、参加者には東北大学の規定に基づき謝礼が支払われた。

5.2 インタラクション手法

比較対象とする手法は、フリックスクロール(Flick)と、画面上に表示されるジョイスティック(Virtual Joystick: VJ)の2つとし、いずれもShearSheetを装着していない状態で使用してもらった。Flickは最も一般的な手法として、VJは弾性フィードバックの有無による影響を

調査するために採用した。タッチ入力環境では他にも様々なスクロールインタフェースが存在するが、本実験の主目的は ShearSheet の基本的なパフォーマンスを確認することであるため、これらの 2 手法との比較で十分と考えた。以下では、各手法における詳細な実装について示す。

5.2.1 ShearSheet

ShearSheet を用いたスクロール操作の挙動は、3.2.4 項ですでに述べたとおりである。

5.2.2 Flick

現在、最も一般的に使われている手法である。ドラッグによる位置制御と、フリックジェスチャによる慣性スクロールの両方を使うことを可能とした。慣性スクロールは、iOS 12 の挙動と同様になるよう調整した。

5.2.3 Virtual Joystick (VJ)

本手法では、画面上の同じ位置を 0.3 秒間以上タッチする操作を検出すると、図 11 (a) に示すようなひし形のインジケータを表示させる (タッチを離すとインジケータは消える)。0.3 秒という時間の長さは、誤って発動させることのない最小値として予備検討により決定された。インジケータの表示後、ユーザによるドラッグ距離に応じた速度制御の操作モードとなる。これにともない、インジケータはこのドラッグ距離 (スクロール速度) に応じて変形し (図 11 (b)), スクロール速度の視覚フィードバックとして機能するようにした。なお、スクロール速度に関するアルゴリズムは ShearSheet とほぼ同様で、式 (2) における d をドラッグの変位量に読み替えたものであり、インジケータの高さ h_{VJ} (図 11 (c)) はこの式 (2) の r の値に相当する。また、ShearSheet と同様に、インジケータ非表示時にはドラッグによる通常の位置制御スクロールも利用可能とした。

5.3 実験環境

実験は、Android 8.1.0 を搭載する LG Nexus 5X を用いた。ディスプレイは 5.2 インチで解像度 1,080 × 1,920 ピクセル、423 ppi であった。実験ソフトウェアは Unity で開発され、プログラムは C# で記述した。

5.4 実験計画とタスク

実験は、3 要因実験計画 (インタラクション手法、ターゲット距離、ターゲット既知) による、テキストドキュメントの画面外ターゲット獲得タスクとした。図 12 (a) に、タスクの初期画面を示す。半透明青色の領域 (スクリーンサイズの半分) が画面上に固定されて表示されており、初期画面にはターゲットのある方向を示す矢印 (上または下向き) が表示される。5.2 節に示したいずれかのインタラクション手法を用いて矢印の方向へスクロールし、ターゲットとなる赤色のテキスト行を見つけ、このターゲット行を半透明青色の領域内に収めるとタスク完了となる。これを 1 試行とし、試行を完了した 2 秒後には自動的に次の試行が

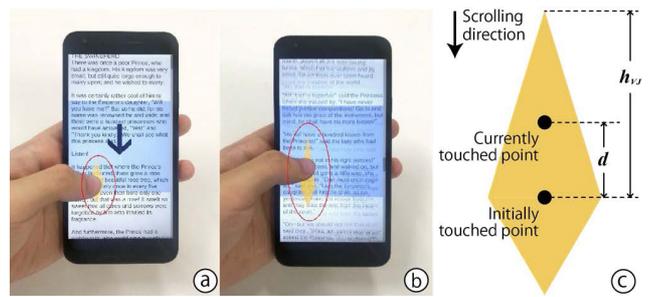


図 11 Virtual Joystick の挙動。(a) 長押し操作によりインジケータが出現し、(b), (c) スクロール速度に応じて変形する

Fig. 11 Behavior of Virtual Joystick. (a) An indicator appears when the user maintains touch and (b), (c) it deforms with the scrolling rate.

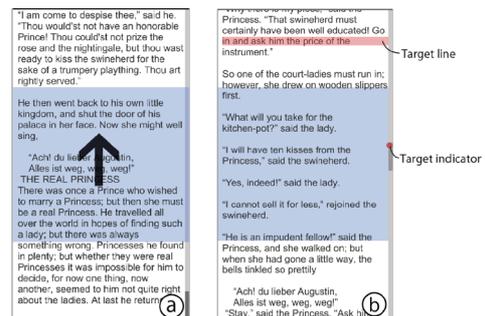


図 12 (a) タスク初期画面、(b) ターゲット既知条件時

Fig. 12 Screen view. (a) When the task start and (b) in the target known condition.

開始される。また、各試行においてはターゲットの位置が既知/未知である 2 条件が存在し、ターゲット既知の条件においては、図 12 (b) に示すように、ターゲットの位置を示す小さな赤い点がスクロールバーの領域にあらかじめ表示される。一方でターゲット未知の条件では、この表示はない。テキストには、著作権フリーの童話 (Hans Christian Andersen's Fairy Tales) を用いた。ターゲット距離は、このようなテキストドキュメントを表示する際の現実的なスクロール距離として 4 種類 (50, 75, 100, 125 cm) を用意した。

3 つのインタラクション手法を提示する順序は、参加者間でカウンターバランスをとった。ターゲット既知/未知の条件については同一手法内で個別に提示し、その順序は参加者間で同様にバランスをとった。各手法のターゲット既知/未知の各条件において、4 種類のターゲット距離 × 4 反復 (スクロール方向は上方向 × 2 と下方向 × 2 を含む) = 16 回の試行がランダムな順序で実施された。

各手法は、いずれも速度制御・位置制御を含む複数種類のスクロール操作を備えているが、参加者にはこれらを自由に組み合わせて良いことを教示した。また、デバイスの把持方法については、剪断入力にあまり影響を及ぼさないという先行研究 [20] の結果に従い、特に教示は与えなかった。ただし、手法間の公平な比較のため、実験中に把持方

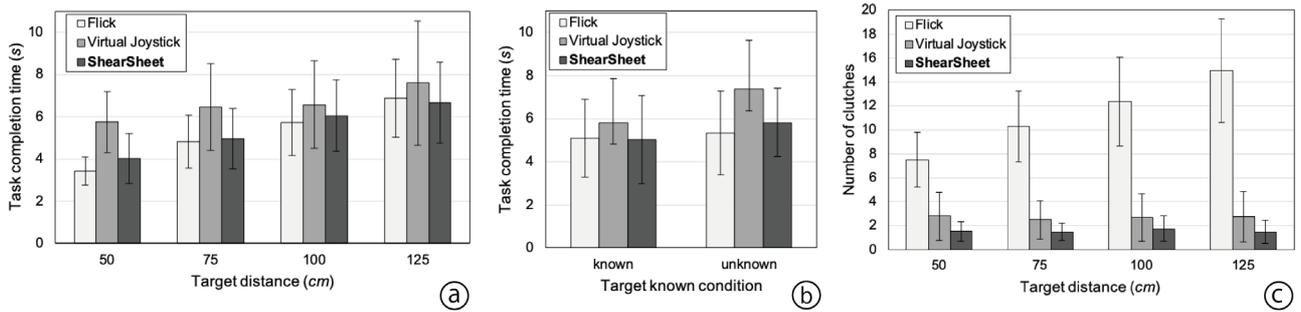


図 13 実験結果 (a) ターゲット距離 vs. タスク完了時間, (b) ターゲット既知/未知 vs. タスク完了時間, (c) ターゲット距離 vs. 操作回数

Fig. 13 Experimental results. (a) Target distance vs. Task completion time, (b) Target known vs. Task completion time. (c) Target distance vs. Number of clutches.

法を大きく変えることは避けるように教示した。各手法の試行前には、参加者が使い方に慣れるまでの練習（数分程度）を設けた。ゴムバンドの耐久性を考慮し、3~4名の参加者が実験を終了するたびに新しいものに交換した。

各試行における測定項目は、タスク完了時間と操作回数（タッチ開始から終了までを1回とする）であった。参加者は、各条件で16回の試行を終えた後、NASA-TLXの質問紙に回答を記入し、ShearSheetとVJにおいてはタスクの完了後にSystem Usability Scale (SUS)の質問紙を記入した。全試行の終了後、主観的な意見を収集するためのインタビューを実施した。実験時には、参加者らの同意のうえで、彼らの様子をビデオカメラで撮影した。

5.5 実験結果

12名の参加者から取得された計1,152回の試行から、Grubbs-Smirnov検定で外れ値として判定された8試行を除外した。また、タスク完了時間および操作回数のいずれにおいても、Leveneの検定により等分散性が確認された ($p > .05$) ため、以下の解析を進めた。

5.5.1 タスク完了時間

図13(a)および13(b)に、各ターゲット距離およびターゲット既知/未知の各条件における3つの手法のタスク完了時間の結果をそれぞれ示す。3要因分散分析の結果、インタラクション手法 ($F(2, 22) = 8.208, p < .01, \eta_p^2 = 0.427$)、ターゲット距離 ($F(3, 33) = 91.432, p < .01, \eta_p^2 = 0.893$)、ターゲット既知 ($F(1, 11) = 21.397, p < .01, \eta_p^2 = 0.660$) すべての要因に主効果が認められた。また、手法とターゲット距離 ($F(1, 11) = 21.397, p < .01, \eta_p^2 = 0.660$)、手法とターゲット既知 ($F(1, 11) = 21.397, p < .01, \eta_p^2 = 0.660$)、ターゲット距離とターゲット既知 ($F(3, 33) = 6.938, p < .01, \eta_p^2 = 0.387$) の間に交互作用が見られた。

手法の主効果についてBonferroniの多重比較を行ったところ、ShearSheetはVJに比べ有意に短いタスク完了時間であった ($p < .01$) 一方で、ShearSheetとFlickの間に差は見られなかった ($p > .05$)。他の主効果について同様の

多重比較を行った結果、ターゲット距離が長くなるにつれて有意にタスク完了時間も増加し ($p < .01$)、ターゲット未知の場合は既知の場合に比べて有意にタスク完了時間が大きい ($p < .01$) ことが分かった。

また、交互作用に関する単純主効果を調べたところ、ターゲット未知の場合にShearSheetのタスク完了時間はFlickに比べて有意に長くなることが分かった ($p < .05$)。また、ターゲット距離が50cmと75cmの場合、およびターゲット未知の場合に、VJが他の2手法に比べて有意に長いタスク完了時間であることも分かった ($p < .01$)。

5.5.2 操作回数

図13(c)に、各ターゲット距離における3つの手法の操作回数を示す。3要因分散分析の結果、手法 ($F(2, 22) = 199.890, p < .01, \eta_p^2 = 0.948$) およびターゲット距離 ($F(3, 33) = 71.669, p < .01, \eta_p^2 = 0.867$) に主効果が見られ、ターゲット既知/未知 ($F(1, 11) = 8.208, p > .05, \eta_p^2 = 0.017$) には主効果は見られなかった。手法とターゲット距離の間で交互作用も見られた ($F(6, 66) = 79.782, p < .01, \eta_p^2 = 0.873$)。手法の主効果についてBonferroniの多重比較を行ったところ、ShearSheetはFlickとVJの2手法に比べ操作回数が有意に少ないことが分かった ($p < .01$)。手法とターゲット距離の交互作用に関する単純主効果を調べたところ、Flickはターゲット距離が大きくなるにつれて有意に操作回数も増加する ($p < .01$) 一方で、ShearSheetとVJではいずれのターゲット距離の間でも操作回数に差は見られなかった ($p > .05$)。

5.5.3 NASA-TLX

各手法におけるNASA-TLXの平均スコアは、小さい順にShearSheet (23.54)、VJ (27.33)、Flick (28.19) となり、手法間に有意差は見られなかった ($Friedman \chi^2(2) = 3.50, p > .05$)。6つの評価項目（精神的要求、身体的要求、時間切迫感、作業達成度、努力、不満）について同様に手法間のスコアを比較したところ、VJは他の2手法に比べ有意に精神的要求が高く ($p < .01$)、ShearSheetに比べ時間切迫感が高かった ($p < .01$) ことが分かった。

5.5.4 SUS スコア

ShearSheet の SUS 平均スコアは 76.0 であり、これは形容詞の評価 [2] で「GOOD」に相当する。一方で、VJ の平均スコアは 72.0 (「ACCEPTABLE」に相当) であった。

5.5.5 参加者へのインタビュー

各参加者に最も好ましい手法を尋ねたところ、9 名が ShearSheet、残りの 3 名が VJ を選択した。Flick を選択した参加者はいなかった。ShearSheet に関して、多くの参加者から、使いやすい、心地良いといったポジティブな感想が第一声としてあがった。心地良さに関して詳しく尋ねたところ、複数名の参加者が、速度の微調整が容易である点をあげた。具体的には、「ゴムの弾性力のおかげで素早く反応できる」「ストレスなくシートを離してスクロールを止めることができ、非常に直感的だった」「長距離だけでなく短距離のスクロールのときも使いやすかった」等のコメントが得られた。一方で、長距離のスクロールの場合には剪断力を一定時間入力し続ける必要があり、このことに身体的な疲労を訴えた参加者もいた。

ShearSheet では剪断入力による速度制御と通常のドラッグによる位置制御の 2 種類の操作が用意されていたが、これらの使い分けについて各参加者に尋ねた。この結果、長距離のスクロールの際には全参加者が剪断入力を使用しており、短距離のスクロールには 4 名が剪断入力、5 名はドラッグを使用し、残りの 3 名は試行によってまちまちであったと答えた。このことから、大半の参加者は速度制御と位置制御を切り替えながら使用していたことが分かる。

Flick に関しては、慣れ親しんだ手法であるがゆえに精神的な負荷は少なかったと述べる参加者もいたが、繰返しのフリック動作が面倒だったというネガティブな面をあげる参加者がほとんどであった。VJ については、習得しやすさを理由に最も好ましい手法として選ぶ参加者もいたが、物理的なフィードバックがないためにスクロール速度が過度に上がってしまう等、速度の微調整の難しさに言及する者が多かった。

6. ユーザフィードバック

国内の学会 (インタラクション 2019) 会場で、ShearSheet を使用したデモアプリケーション (ドキュメントの 1 次元スクロール、地図のズーム操作、FPS ゲームの移動操作) のユーザフィードバックを得た。2 時間で 50 名以上の参加者にデモを体験してもらい、自由にコメントしてもらった。

ほとんどの参加者は、簡単な説明だけで ShearSheet の使い方をすぐに理解し、問題なく使用を開始できた。多くの参加者は、前章の評価実験と同様、第一印象として弾性フィードバックの心地良さをあげていた。また、実装の単純さと適用範囲の広さについて多くの肯定的なコメントが得られ、インタフェースの商用化を望む声も多かった。一方で否定的なコメントとしては、通常のタッチインタラク

ションのユーザ体験がシートによって多少損なわれるという意見があがった。実際に、参加者がドラッグ操作のつもりで指を動かしたがシートが動いてしまい、剪断入力が意図せず発生するケースが主に体験序盤に見られた。また、ゴムバンドの耐久性について懸念するコメントもあった。

提示した各アプリケーションに対しても、おおむね肯定的な意見が得られた。特に FPS ゲームの移動操作に関しては、従来のタッチ入力のみによる操作経験がある参加者は、剪断入力を用いて画面の任意の場所で操作できる点を賞賛していた。ただし、このインタフェースは両手を使う操作であることから、慣れるまでに時間がかかることを指摘する参加者も一部いた。地図のズーム操作については、実用的であるとのコメントが多く得られた。

7. 議論

7.1 ShearSheet の有用性

実験結果から、ShearSheet は VJ よりも短い、Flick と同等の時間で画面外ターゲットを獲得することができ、その際の操作回数は 3 手法の中で最も少なかったことが分かった。また主観評価の結果から、ShearSheet が他手法よりも好まれていたことも明らかになった。したがって、少なくとも 1 次元のスクロールタスクでは、普段からユーザが使い慣れている Flick や物理的フィードバックをとみなわない VJ よりも、ShearSheet の方が優れたパフォーマンスを示すことが確認できたといえる。また、その他のいくつかのアプリケーション例に関するユーザフィードバックから、ShearSheet がタッチインタラクションを拡張するインタフェースとして多用途に利用できることが示唆された。

7.2 弾性フィードバック

VJ は基本的には参加者に好まれていたものの、VJ と同様の操作体系を持つ ShearSheet に比べ、1 試行あたり平均 1.2 秒程度も長いタスク完了時間であった。この理由は 2 つ考えられる。1 つは、VJ では速度制御モードへ切り替えるための長押し (0.3 秒間) 操作が必要であったこと、もう 1 つは、物理的なフィードバックがないために速度の微調整が難しく、余計に時間がかかったことである。後者を裏付けるように参加者からも、VJ では正確なスクロールの制御が難しい、ターゲットを行きすぎることが多かった等のコメントが得られた。一方で ShearSheet では、スクロールを必要に応じて簡単に止められる、という意見が多かった。このことは、タスクを素早く完了させるために弾性フィードバックが有益であったことを示唆している。ただし、NASA-TLX で得られた主観的な作業負荷の結果では、筆者らの予想ほど手法間に大きな差は見られなかった。ShearSheet では剪断入力中、ゴムバンドの反発力が指へ継続的にかかっており、このことが主観的な負荷を大きくした可能性がある。今後、ゴムバンドの硬さの影響を詳しく

調査するとともに、剪断入力検出の精度を高めてシートの変位量を小さくする方法を検討することで、負荷を少なくするよう改善していきたい。

7.3 ShearSheet を用いた速度制御入力

Flick は慣性スクロールを用いるため、通常のドラッグ操作のみを用いる場合よりも操作回数は少なく抑えられる手法であるが、実験結果から、Flick ではスクロールが長距離になるほど操作回数が増大し、他の2手法との差も大きくなっていったことが分かった。参加者からのコメントでも、フリック操作の繰返しによる身体的な疲労が多く報告されていた。これらの結果から、長距離スクロールが発生する状況では、ShearSheet や VJ のような継続的な速度制御操作が有益であることがうかがえる。また、参加者へのインタビューから、ShearSheet の使用においては剪断入力と通常のドラッグ操作を長距離・短距離スクロール間で使い分ける参加者も一部存在していたが、実際の試行の様子の観察からは、ほとんどの参加者はこれらの2つを明確に意識せず、ランダムに切り替える、あるいは同時に入力する様子が多く見受けられた。このことから、本実験では剪断入力が従来のタッチ操作へ自然に馴染み、これらのシームレスな切替えを実現できていたといえる。一方で、これらの2つを明示的に使い分けたい場合(4.1.2項で述べたジェスチャ入力等)にはこの特徴は欠点にもなりうる。このため、ShearSheet の幅広い用途での利用のために、1次元スクロール以外のタスクにおいてさらなるパフォーマンス調査が必要である。

7.4 限界と今後の課題

ShearSheet の実装面における制限・改善点として、導電部を配置させることで画面を部分的にふさいでしまうことがあげられる。透明な導電素材を用いれば画面が隠れることはないが、その領域でのタッチ検出ができないう問題が残る。また、剪断入力時のシートの動きには平行移動だけでなく、厳密には回転動作も含まれる。このため、1カ所の導電部だけではこの動きを正確にとらえることはできず、特に入力位置が導電部から遠くなると、この影響は大きくなると考えられる。本実験のようなスマートフォンの画面サイズではこのようなシートの回転の影響は無視できる程度であったが、より大きな入力領域に対応するためには、回転の影響をキャリブレーションする、または導電部を2カ所配置することが必要だろう。次に、剪断入力を導入することで従来のタッチ入力に影響を及ぼす場合があげられる。5章と6章に述べた実験から、ユーザは剪断入力が誤作動しないように力加減を習得できることが分かったものの、たとえば剪断入力をほとんど使わないようなアプリケーションでは、シートの存在が邪魔に感じられる可能性がある。また別の制限として、アプリケーション

が ShearSheet の利用を想定していない場合、導電部はつねにタッチ認識された状態となり、そのアプリケーションの利用に支障をきたすことがあげられる。これらを防ぐために、シートを容易に着脱できる機構や、導電部の電氣的接触を一時的に遮断できるトグルスイッチ等を考慮する必要があると考えられる。他の改善点として、実用性の向上を考えた場合、ゴムバンドよりも耐久性のある弾性素材である、金属バネやポリウレタン等の材料も検討する必要がある。

今後の展望として、ShearSheet のシートやゴムバンド等の素材に工夫を加えることで、さらに広範なインタラクションを実現できる余地がある。本研究では、ゴムバンドの弾性力は一定のものを使用したが、この弾性力は、剪断入力の操作性やパフォーマンスに大いに影響を与える可能性があるパラメータである。今後は、これらの影響を注意深く調べ、剪断入力をユーザインタフェースに組み込む際のガイドラインとして確立させることを目指していく。さらに、用いる4つのゴムバンドをそれぞれ異なる弾性力で構成することで、インタラクション位置または方向に応じて不均一な弾性フィードバックを提供することも可能である。同様に、シートの形状、伸縮性、手触り等の物理特性を変化させることによる新たなインタラクションや、これらの変化によるパフォーマンスへの影響についても今後検討していきたい。

8. 結論

本論文では、既存の静電容量タッチパネルに剪断入力を付加するユーザインタフェース ShearSheet を提案した。透明シート、導電性材料およびゴムバンドを使用したシンプルな実装により、外部センサを使用することなく、弾性フィードバックをとまなう剪断入力を実現した。本インタフェースの応用として、シングルタッチおよびマルチタッチによる複数のインタラクション手法を設計し、これらを用いたアプリケーション例を実装した。この代表例として1次元のスクロールタスクによる ShearSheet のパフォーマンス評価を実施したところ、本インタフェースは使い慣れた手法であるフリックスクロールと同等の速さで画面外ターゲットを獲得でき、操作回数の観点では最も優れたパフォーマンスであることが分かった。今後は、弾性フィードバックのガイドラインの確立と、素材の検討によるより広範なインタラクションへの拡張に取り組む予定である。

参考文献

- [1] Antoine, A., Malacria, S. and Casiez, G.: ForceEdge: Controlling Autoscroll on Both Desktop and Mobile Computers Using the Force, *Proc. CHI '17*, pp.3281–3292 (2017).
- [2] Brooke, J.: SUS-A quick and dirty usability scale, *Usability evaluation in industry*, Vol.189, pp.4–7 (1996).

- [3] Casiez, G., Vogel, D., Pan, Q. and Chaillou, C.: RubberEdge: Reducing Clutching by Combining Position and Rate Control with Elastic Feedback, *Proc. UIST '07*, pp.129–138 (2007).
- [4] Corsten, C., Daehlmann, B., Voelker, S. and Borchers, J.: BackXPress: Using Back-of-Device Finger Pressure to Augment Touchscreen Input on Smartphones, *Proc. CHI '17*, pp.4654–4666 (2017).
- [5] Corsten, C., Voelker, S., Link, A. and Borchers, J.: Use the Force Picker, Luke: Space-Efficient Value Input on Force-Sensitive Mobile Touchscreens, *Proc. CHI '18*, Paper No.661 (2018).
- [6] Hakoda, H., Fukatsu, Y., Shizuki, B. and Tanaka, J.: Back-of-Device Interaction based on the Range of Motion of the Index Finger, *Proc. OzCHI '15*, pp.202–206 (2015).
- [7] Han, J., Ahn, S., Park, K. and Lee, G.: Designing Touch Gestures Using the Space around the Smartwatch as Continuous Input Space, *Proc. ISS '17*, pp.210–219 (2017).
- [8] Harrison, C. and Hudson, S.: Using Shear as a Supplemental Two-Dimensional Input Channel for Rich Touchscreen Interaction, *Proc. CHI '12*, pp.3149–3152 (2012).
- [9] Harrison, C. and Hudson, S.E.: Minput: Enabling Interaction on Small Mobile Devices with High-Precision, Low-Cost, Multipoint Optical Tracking, *Proc. CHI '10*, pp.1661–1664 (2010).
- [10] Hasan, K., Ahlström, D., Kim, J. and Irani, P.: Air-Panes: Two-Handed Around-Device Interaction for Pane Switching on Smartphones, *Proc. CHI '17*, pp.679–691 (2017).
- [11] Heo, S. and Lee, G.: Force Gestures: Augmented Touch Screen Gestures Using Normal and Tangential Force, *Proc. UIST '11*, pp.621–626 (2011).
- [12] Heo, S. and Lee, G.: Indirect Shear Force Estimation for Multi-Point Shear Force Operations, *Proc. CHI '13*, pp.281–284 (2013).
- [13] Herot, C.F. and Weinzapfel, G.: One-Point Touch Input of Vector Information for Computer Displays, *Proc. SIGGRAPH '78*, pp.210–216 (1978).
- [14] Huang, M., Fujita, K., Takashima, K., Tsuchida, T., Manabe, H. and Kitamura, Y.: ShearSheet: Low-Cost Shear Force Input with Elastic Feedback for Augmenting Touch Interaction, *Proc. ISS '19*, pp.77–87 (2019).
- [15] Ikematsu, K. and Siio, I.: Ohmic-Touch: Extending Touch Interaction by Indirect Touch through Resistive Objects, *Proc. CHI '18*, Paper No.521 (2018).
- [16] Ikematsu, K. and Siio, I.: Carbon copy metaphor: combining absolute and relative coordinates inputs for trackpad, *Proc. OZCHI '17*, pp.492–496 (2017).
- [17] Kato, K. and Miyashita, H.: Extension Sticker: A Method for Transferring External Touch Input Using a Striped Pattern Sticker, *Proc. CHI '15*, pp.1851–1854 (2015).
- [18] Le, H.V., Bader, P., Kosch, T. and Henze, N.: Investigating Screen Shifting Techniques to Improve One-Handed Smartphone Usage, *Proc. NordiCHI '16*, Article No.27 (2016).
- [19] Le, H.V., Mayer, S., Bader, P. and Henze, N.: A smartphone prototype for touch interaction on the whole device surface, *Proc. MobileHCI '17*, Article No.100 (2017).
- [20] Le, H.V., Mayer, S. and Henze, N.: InfiniTouch: Finger-Aware Interaction on Fully Touch Sensitive Smartphones, *Proc. UIST '18*, pp.779–792 (2018).
- [21] Lee, B., Lee, H., Lim, S.-C., Lee, H., Han, S. and Park, J.: Evaluation of human tangential force input performance, *Proc. CHI '12*, pp.3121–3130 (2012).
- [22] Minsky, M.R.: Manipulating Simulated Objects with Real-world Gestures using a Force and Position Sensitive Screen, *Proc. SIGGRAPH '84*, pp.195–203 (1984).
- [23] Nakai, Y., Kudo, S., Okazaki, R. and Kajimoto, H.: Tangential Force Input for Touch Panels Using Bezel-Aligned Elastic Pillars and a Transparent Sheet, *Proc. UIST'14 Adjunct*, pp.111–112 (2014).
- [24] Nakai, Y., Kudo, S., Okazaki, R., Kajimoto, H. and Kuribayashi, H.: Detection of Tangential Force for a Touch Panel Using Shear Deformation of the Gel, *Proc. CHI EA '14*, pp.2353–2358 (2014).
- [25] Rendl, C., Kim, D., Parzer, P., Fanello, S., Zirkl, M., Scheipl, G., Haller, M. and Izadi, S.: FlexCase: Enhancing Mobile Interaction with a Flexible Sensing and Display Cover, *Proc. CHI '16*, pp.5138–5150 (2016).
- [26] Rutledge, J.D. and Selker, T.: Force-to-motion Functions for Pointing, *Proc. INTERACT '90*, pp.701–706 (1990).
- [27] Spelmezan, D., Appert, C., Chapuis, O. and Pietriga, E.: Side Pressure for Bidirectional Navigation on Small Devices, *Proc. MobileHCI '13*, pp.11–20 (2013).
- [28] Sridhar, S., Markussen, A., Oulasvirta, A., Theobalt, C. and Boring, S.: WatchSense: On- and Above-Skin Input Sensing through a Wearable Depth Sensor, *Proc. CHI '17*, pp.3891–3902 (2017).
- [29] Takashima, K., Shinshi, N. and Kitamura, Y.: Exploring Boundless Scroll by Extending Motor Space, *Proc. MobileHCI '15*, pp.557–566 (2015).
- [30] Voelker, S., Nakajima, K., Thoresen, C., Itoh, Y., Øvergård, K.I. and Borchers, J.: PUCs: Detecting Transparent, Passive Untouched Capacitive Widgets on Unmodified Multi-touch Displays, *Proc. ITS '13*, pp.101–104 (2013).
- [31] Wang, X., Ishikawa, M., Takashima, K., Adachi, T., Sharlin, E., Finn, P., and Kitamura, Y.: Designing Action-Characterizing Toy Blocks for Behavior Assessments, *Proc. CHI EA '18*, Paper No.LBW513 (2018).
- [32] Wigdor, D., Forlines, C., Baudisch, P., Barnwell, J. and Shen, C.: LucidTouch: A See-Through Mobile Device, *Proc. UIST '07*, pp.269–278 (2007).
- [33] Xiao, R., Laput, G. and Harrison, C.: Expanding the Input Expressivity of Smartwatches with Mechanical Pan, Twist, Tilt and Click, *Proc. CHI '14*, pp.193–196 (2014).
- [34] Yamada, W., Manabe, H. and Ikeda, D.: CamTrack-Point: Camera-Based Pointing Stick Using Transmitted Light through Finger, *Proc. UIST '18*, pp.313–320 (2018).
- [35] Zhai, S. and Smith, B.A.: Multistream input: An experimental study of document scrolling methods, *IBM Syst. J.*, Vol.38, No.4, pp.642–651 (1999).
- [36] Zhai, S. and Shumin: User performance in relation to 3D input device design, *ACM SIGGRAPH Comput. Graph.*, Vol.32, No.4, pp.50–54 (1998).
- [37] PUBG MOBILEなどで操作性向上, 1 コインサイズのスマホ用ジョイスティックを試してみた, 入手先 (<https://www.watch.impress.co.jp/donya/DN-915908.html>) (参照 2020-07-10).



藤田 和之

2010年大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻博士前期課程修了。2013年同研究科情報システム工学専攻博士後期課程修了，同年(株)イトーキ入社。2018年より東北大学電気通信研究所助教。博士(情報科学)。

科学)。



北村 喜文 (正会員)

1987年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同年キャノン株式会社，1992年ATR通信システム研究所，1997年大阪大学大学院工学研究科/情報科学研究科助教/准教授。2010年より東北大学電気通信研究所

教授。2018年より副所長。博士(工学)。



黄 梦婷

2016年天津大学電子情報工学部卒業。2017年東北大学大学院情報科学研究科システム情報科学専攻入学。2019年同研究科博士前期課程修了。ユーザインタフェースに関する研究に従事。



高嶋 和毅 (正会員)

2006年大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻博士前期課程修了。2008年同専攻博士後期課程修了。同年同大学院国際公共政策研究科助教。2011年より東北大学電気通信研究所助教。2018年より同研究所

准教授。博士(情報科学)。



土田 太一

2015年東北大学工学部電気情報物理工学科入学，2020年同学科卒業。ユーザインタフェースに関する研究に従事。



真鍋 宏幸 (正会員)

1999年東京工業大学工学部卒業。2001年同大学大学院修士課程修了。同年(株)NTTドコモ入社。2019年より芝浦工業大学。ウェアラブル/ユビキタスコンピューティングのための入出力デバイス，生体信号を用いた入

力インタフェースの研究に従事。博士(工学)。